

## **MODELO MULTIOBJETIVO DE PLANIFICACIÓN DE TRANSMISIÓN BAJO INCERTIDUMBRE BASADO EN UNA ÓPTIMA RESPUESTA DE LA DEMANDA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
MODELO MULTIOBJETIVO DE PLANIFICACIÓN DE TRANSMISIÓN  
BAJO INCERTIDUMBRE BASADO EN UNA ÓPTIMA RESPUESTA DE LA  
DEMANDA**

**AUTOR:  
LUIS ALBERTO BARRAGAN MURILO**

**DIRECTOR:  
EDWIN MARCELO GARCÍA TORRES**

**Quito, julio de 2016**

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Edwin Marcelo García Torres declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Modelo Multiobjetivo de Planificación de transmisión bajo incertidumbre basado en una óptima respuesta de la demanda* realizado por Luis Alberto Barragán Murillo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Julio 2016



.....  
Edwin Marcelo García Torres

Cédula de identidad: 1803087400

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Luis Alberto Barragán Murillo con documento de identificación N° 1717553778, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*Modelo Multiobjetivo de Planificación de transmisión bajo incertidumbre basado en una óptima respuesta de la demanda*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....  
Nombre: Luis Alberto Barragán Murillo

Cédula: 1717553778

Fecha: Julio 2016

## ***ÍNDICE GENERAL***

<b><i>ÍNDICE GENERAL</i></b> .....	4
<b><i>ÍNDICE DE FIGURAS</i></b> .....	4
1. Introducción .....	2
2. Métodos de Optimización Multiobjetivo .....	3
3. Formulación del Problema .....	5
4. Caso de Estudio.....	6
5. Conclusiones .....	10
Referencias.....	10
5.2 Estado del Arte.....	14

## ***ÍNDICE DE FIGURAS***

Figura 1: Sistema de distribución aéreo urbano.....	3
Figura 2: Distribución de la energía aplicando la teoría de grafos. ....	4
Figura 3: Árbol de la respuesta a la demanda. ....	4
Figura 4: Sistema de 4 barras.....	6
Figura 5: Característica del sistema cuando la generación y demanda son iguales....	7
Figura 6: Característica del sistema cuando la generación tiende a ser mayor a la demanda a cubrir.....	7
Figura 7: Característica del sistema cuando se tiene generación distribuida. ....	8
Figura 8: Característica del sistema cuando se tiene generación menor a demanda....	8
Figura 9: Característica del sistema en ocurrencia de falla línea a tierra.....	8
Figura 10: Comportamiento de la capacidad de la Línea de Distribución.....	9
Figura 11: Comportamiento de la capacidad Máxima de la Línea de Distribución Vs Demanda en estudio.....	9
Figura 12: Comportamiento de la Duración de la Demanda Vs Aporte de Generación.....	9
Figura 13: Comportamiento de la Duración de la Demanda Vs Aporte de Generación Distribuida.....	9

Figura 14: Cambios en la demanda y la capacidad de la línea en el tiempo..... 10

Figura 15: Conjunto multiobjetivo de Pareto eficiente de demanda y capacidad de línea..... 10

# MODELO MULTIOBJETIVO DE PLANIFICACIÓN DE TRANSMISIÓN BAJO INCERTIDUMBRE BASADO EN UNA ÓPTIMA RESPUESTA DE LA DEMANDA

## Resumen

En el presente trabajo se propone usar optimización Multiobjetivo con el principio de Pareto en un sistema de distribución con base en el sistema cuatro barras de la IEEE, conformado por un generador de tipo convencional y generación distribuida (DG) en la barra donde se conecta la carga, y el resto de barras se conectan con tres líneas de doble circuito. Para la obtención de datos se ha empleado del software de simulación Digsilent PowerFactory®, para ver las diferencias entre un sistema sin generación distribuida respecto al sistema con generación distribuida, enfatizando lo que ocurre con la capacidad de las líneas de transmisión. Mediante un árbol de decisión se determina las causas para que el sistema se sobrecargue en el tiempo y las posibles soluciones a dicho conflicto. Para esto se procede a modelar mediante técnicas de regresión el comportamiento del aumento de demanda, la pérdida de capacidad disponible de las líneas y la generación, para establecer las funciones objetivo. Usando el conjunto de Pareto se minimiza la demanda de tal manera que la capacidad de la línea se maximice obteniendo un sistema que pueda mantenerse en operación estable un tiempo mayor al proyectado.

**Palabras Clave:** Red de transmisión, Generación distribuida, Sistema de gestión de la demanda, Optimización multiobjetivo, Conjunto de Pareto

## Abstract

In the present paper it proposes using multi-objective optimization with the Pareto principle in a distribution system based on the system four bars of the IEEE, comprising by a generator type conventional and distributed generation (DG) in the bar where it connects the load, and the other rods are connected with three double circuit lines. To obtain data has been used simulation software Digsilent PowerFactory® to see the differences between a distributed system without regard to the system with distributed generation, emphasizing what happens with the capacity of transmission lines generation. Through a decision tree causes the system to overload in time and possible solutions to the conflict is determined. For this we proceed to modeling using regression techniques behavior increased demand, the loss of available capacity lines and generation, to establish the objective functions.

Using the Pareto set demand it is minimized so that the line capacity is maximized to obtain a system that can maintain stable operation time greater than projected.

**Keywords:** Transmission Grid, Distributed Generation, System Demand Management, Multi-objective Optimization, Pareto Set.



## 1. Introducción

Con el fin de obtener respuestas de la demanda, se debe tomar en cuenta aspectos importantes como: la fiabilidad, economía, calidad del servicio eléctrico, regirse a las regulaciones existentes, flujos de transmisión y mantener el sistema siempre abastecido a bajo costo [1][2].

Una de las grandes problemáticas que se tiene en el abastecimiento de la demanda es el crecimiento de la red, proyectado a futuro. Para ello se debe emplear optimización de tipo Multiobjetivo como la que pueden ofrecer las redes neuronales, el uso de la lógica difusa, algoritmos genéticos, así como el método de Pareto. Dicho método permitirá proveer de un mejor servicio para que el usuario final obtenga la distribución de energía eléctrica a un costo razonable [3][4].

Los costos asociados a la generación, transmisión y distribución de la energía pueden variar dependiendo si la distribuidora se acoge o no a valores marginales o a costos reales, notando que también pueden existir subsidios y otros valores asociados dependiendo del mercado eléctrico existente. Esos valores se pueden manejar de manera que el usuario pague por energía consumida y no por energía perdida[5][6].

Lo más importante para el usuario final es que se entregue un servicio de calidad, para cumplir con ello se realizan evaluaciones de forma constante, que permitan la obtención de un esquema optimizado [7]–[9].

La optimización tendrá directa relación con la respuesta a la demanda, permitiendo saber las falencias del sistema específicamente en la red de transmisión para que la energía se transmita de manera más eficiente desde los centros de generación hasta los consumidores[10]–[12]. Para ello esta investigación mediante datos obtenidos permitirán denotar el comportamiento del sistema y los eventos incontrolables

existentes, incluyendo el crecimiento de la demanda [13]–[15].

Al producirse una falla en la red de transmisión ocasiona cortes de energía conocido también como blackout, Esto puede variar si las operadoras del servicio no están regidas bajo parámetros de operación y penalización por parte de la autoridad reguladora [16]–[18].

El distribuidor como empresa que recibe la energía también es un ente que sufre falencias técnico-administrativas, una de estas falencias puede ser efecto que produce el crecimiento de la demanda y no disponer el recurso principal que constituyen las líneas de transmisión correctamente dimensionadas para poder abastecer el crecimiento futuro[19].

En este punto se maneja incertidumbre en las redes de transmisión, que puede ser analizada considerando aspectos económicos, el tipo de topología de la red, estadísticas de cortes por sobrecargas, por efectos naturales, por criterios regulatorios, por nombrar otros[19][20].

El objeto en el presente artículo es resolver bajo una metodología de optimización la obtención de una respuesta óptima de la demanda tomando en cuenta las incertidumbres en el crecimiento de la misma, conociendo que la generación tiene la disponibilidad de abastecer una demanda mayor futura y entregarle la energía al usuario final; sin embargo las líneas de transmisión conforme transcurra su vida útil no podrán soportar el flujo circulante debido a la limitación física de capacidad, por lo que se requerirá una optimización en la planificación de las líneas futuras o en su defecto un reforzamiento de la red existente, considerando varios objetivos incluyendo la reducción de pérdidas eléctricas, caídas de voltaje inadmisibles, entre otros; pretendiendo la obtención de una solución que responda en forma multiobjetiva bajo el principio de Pareto representado en la figura 1 [21][22].



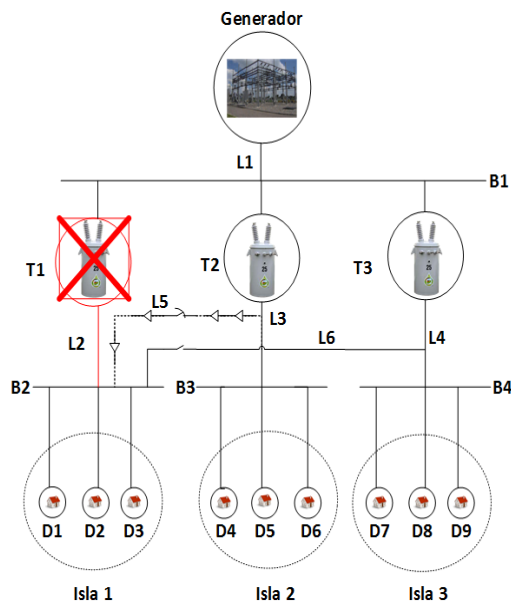
**Figura 1:** Sistema de distribución aéreo urbano.

## 2. Métodos de Optimización Multiobjetivo

En términos de distribución, la principal función que cumple la o las empresas de distribución es suministrar energía a la demanda, para ello se debe considerar las pérdidas en el transporte de la energía desde los puntos de generación que tradicionalmente están alejados de los grandes centros de consumo, por lo que se requieren líneas de transmisión y distribución que tengan una capacidad adecuada para abastecer el crecimiento de la demanda y la expansión de la generación tradicional y distribuida [23]. En el último tramo de subtransmisión necesariamente se debe contar con una red robusta y confiable para que el usuario final obtenga la energía de calidad de forma segura y con una cantidad mínima de desabastecimiento. Cuando se tiene líneas de transmisión con capacidades cercanas a las nominales y, teniendo presente que el sistema de generación es capaz de cubrir el crecimiento de la demanda, surgen grandes inconvenientes en los sistemas de transmisión incluyendo cortes repetitivos del suministro, racionamientos del servicio en horas pico, reducción de la vida útil de los equipos e instalaciones; cuando la demanda incrementa en el tiempo por factores como el aumento de la población, el ingreso de nuevas cargas y

otros aspectos decisivos [24]. Surge de esta forma una interrogante que podría ser contestada por medio de la regulación de la energía que se provee al usuario final observando los perfiles de consumo en el tiempo y en forma presente, de tal forma que no existan inconvenientes para abastecer a cada uno de los tipos de usuarios o clientes del distribuidor [19]. Al no tener una red inteligente se tiende a usar dispositivos que permitan la obtención de una amplia gama de datos; una de las formas de recolección son dispositivos colocados en los puntos finales de entrega de energía a las cargas o clientes, así también se podría plantear el uso de sistemas SCADA[19].

Para una óptima funcionalidad de las redes de transmisión en la actualidad, se ha planteado el uso de la optimización que permitirá direccionar la energía hacia el usuario final sin desperdicio de recursos, esto también depende de la topología que se pretenda emplear, para ello resulta importante el uso de la teoría de grafos. Esta teoría trata sobre la representación de una red por medio de vértices y aristas con los cuales se busca la maximización o minimización de cierta función objetivo [25]–[27]. Esto se puede apreciar en la Figura 2[26]. Con la reducción de la trayectoria mediante optimización de vía la que trata de tomar el camino más corto y eficiente en caso de algún evento, con el fin de abastecer la demanda sin necesidad de suspensión de servicio a gran escala brindando mayor confiabilidad. La subestación de energía eléctrica ST1 abastece los transformadores 1,2,3 con sus respectivas islas, Al suscitarse una falla en el transformador T1, el sistema de transmisión mediante la teoría de grafo analiza buscando el camino más corto y eficiente dando como resultado que el transformador 2 abastezca la isla 1 y la isla 2, descartando la opción del transformador 3 ya que esta vía está lejos del sitio de falla.



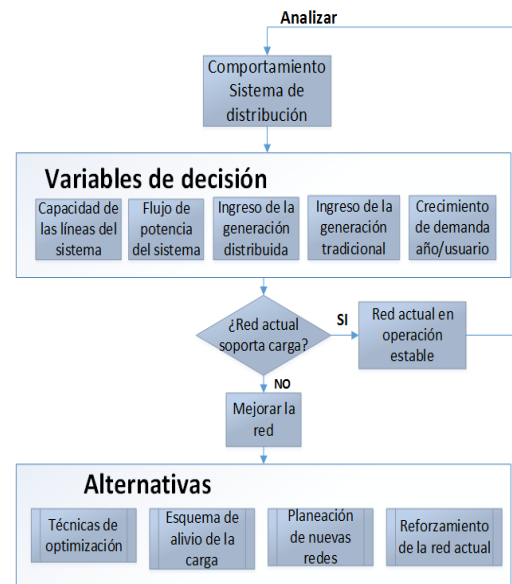
**Figura 2:** Transformador 1 en falla aplicando la teoría de grafos para abastecer demanda.

Para un análisis de las redes de distribución emplea los árboles de decisión, los cuales se basan en procesos de decisión de Markov, que emplean probabilidades de cambio de estado, para poder tomar decisiones que originen un conjunto finito en el que las diversas variables involucradas estén equilibradas, y tal conjunto permita la obtención de la alternativa más óptima al final del proceso[28]. Para la obtención de un conjunto solución factible se toma en cuenta 5 aspectos para la red de distribución, los cuales son:

- La capacidad actual de las líneas de transmisión del sistema;
- El flujo de potencia bidireccional del sistema;
- El ingreso de generadores distribuidos;
- Generación convencional;
- El crecimiento de la demanda bajo incertidumbre por año/usuario.

Considerando tales aspectos y analizando si existe un óptimo desempeño de la red se posibilita un funcionamiento exitoso de las líneas de transmisión y una operación estable del sistema.

En el caso de que los aspectos ya nombrados no sean correctamente abarcados y por tanto no permitan una operación estable, se podría presentar un escenario en el cual la red de transmisión no soporte la carga, las opciones a tomarse podrían incluir el mejoramiento de las líneas actuales, lo cual haría que las líneas sean reforzadas, la aplicación de técnicas de optimización, un esquema de alivio de carga, o el planeamiento de nuevas redes y así poder abastecer la demanda deseada, El funcionamiento de los aspectos mencionados se pueden apreciar en el árbol de decisión sobre la respuesta de la demanda (Figura 3)[28].



**Figura 3:** Árbol de decisión sobre la respuesta a la demanda.

Por otro lado, se debe tener presente que la demanda futura no podrá ser pronosticada exactamente debido a la incertidumbre; y esto podría llegar a limitar la capacidad de las líneas de transmisión en su diseño original, haciendo que las mismas colapsen al no poder abastecer tal crecimiento. Por lo que se debe contar con un sistema que pueda responder a estos cambios de la demanda y una planificación óptima; ante ello se puede aplicar métodos de optimización Multiobjetivo.

La optimización aparece a partir de un posible mejoramiento del estado del

sistema, nombrarán algunas de las alternativas para manejar de forma Multiobjetiva al problema presente:

- Algoritmos genéticos
- Redes neuronales
- Lógica difusas
- Pareto

Los algoritmos genéticos son la sucesión de ítems ordenados a seguir para la solución de problemas de búsqueda y optimización [29].

Las Redes Neuronales Artificiales requieren de un vector de entrada, o una base de datos muy amplia que permita modelar adecuadamente el comportamiento del sistema de transmisión. Tal impedimento implica que el uso de esta herramienta de optimización se vea disminuida en gran cantidad, respecto a técnicas alternativas para el análisis de la capacidad disponible de las líneas de transmisión y distribución. Es por ello que las redes neuronales podrían tener aplicaciones puntuales como el establecimiento de la transferencia óptima de potencia de un área específica del sistema, en este caso un área cuyo comportamiento sea fácilmente modelable con datos preexistentes[30]–[32].

La lógica difusa está basado en la comparación de datos obtenidos y a las veces dando un valor límite verdadero falso a sus extremos [30], [33], [34].

Pareto es la regla 80/20 esto quiere decir que el 80 por ciento de la demanda total es utilizada, mientras el 20 por ciento queda como reserva para futuras demandas [35].

Para el caso de estudio, se asume que el 20% de las líneas de transmisión abastecen de suministro eléctrico a un 80% de la demanda, tomando en cuenta las demandas futuras.

### 3. Formulación del Problema

Dado que la demanda por su propia naturaleza es una variable con gran cantidad de incertidumbre, luego de ser alimentada con datos iniciales por medio del árbol de la respuesta a la demanda, es necesario representarla como una función de distribución, en este caso se la representa con la función de tipo normal (Ecuación 1)[28].

$$D = \sum_{i=1}^C m_{D_i} + \sqrt{\sum_{i=1}^C (\sigma_i)^2} \quad (1)$$

Donde:

D: Demanda del sistema en p.u.

$m_{D_i}$  : Media de la demanda anual del año i en kW

$\sigma_i$  : Desviación estándar de la demanda del año i en p.u.

C: Cantidad de años en estudio.

Para analizar el comportamiento del sistema es necesario recurrir a las ecuaciones de flujo de potencia de corriente alterna bajo metodologías tradicionales como Newton-Raphson, siendo los parámetros variables los ángulos y los voltajes en las barras que dan origen al flujo correspondiente. Si la ecuación del flujo de potencia activa es la siguiente[36]:

$$P_i = \sum_{j=1}^K V_{ij} (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) \quad (2)$$

Siendo:

j: Barra j-ésima del sistema en p.u.

i: Barra i-ésima del sistema en p.u.

$P_i$  : Potencia de la barra i en p.u.

K: número de barras del sistema p.u.

$G_{ij}$  : Conductancia entra las barras i-j en p.u.

$B_{ij}$ : Susceptancia entre las Barras i-j en p.u.

$V_{ij}$ : Voltaje entre las Barras i-j en p.u.

Con el objetivo de reconocer el comportamiento de los generadores involucrados en el sistema en estudio, se cuenta con las siguientes ecuaciones donde la variable independiente es la Demanda media anual del sistema:

$$G_{conv} = 3.5 * D^3 + 8.6 * D^2 + 7.1 * D - 1.2 \quad (3)$$

$$G_{dist} = 1.4 * D^3 + 4.7 * D^2 - 5.1 * D - 0.89 \quad (4)$$

Ambas cantidades de generación están expresadas en por unidad (p.u).

Otra de las variables a tomar en consideración es la capacidad de la línea en función de la demanda del sistema, es decir, reconocer la capacidad sobrante de la originalmente instalada en función de la demanda. La ecuación es la siguiente:

$$CapL = 0.29 * D^3 + 0.61 * D^2 + 1.8 * D - 0.12 \quad (5)$$

La capacidad de la línea viene expresada en p.u.

Considerando las ecuaciones previas, es posible proponer el siguiente algoritmo, que permitirá la optimización del sistema de transmisión por medio de técnicas de gestión de la demanda, en este caso los objetivos planteados son la minimización de la demanda y maximización de la capacidad de la línea.

---

**Algoritmo Multiobjetivo de Pareto para manejo de la demanda y capacidad de línea**

---



---

Paso 1: Entradas:

**f1=Datos Demanda**

**f2=Capacidad línea**

Paso 2: Salidas:

**Valor optimización**

Paso 3: Inicializamos:

**[min1, minfn1]=fmin(f1)**

**[min1, minfn1]=fmin(f2)**

Paso 4. **Optimoptions(f1,f2)**

Paso 5. **For r para todo N**

**t=onen\*r;**

**weight=[t,1-t];**

**[x(r+1,:),f(r+1,:)] = fgoalattain(fun, x0,goal,...**

**Weigth, options;**

**End for**

Paso 6: Retorna:

**Plot(Optimoptions)**

Terminar

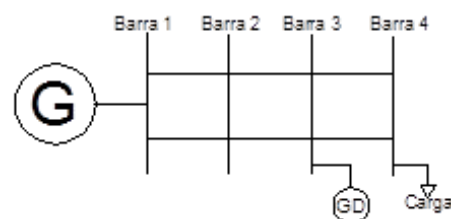
---

## 4. Caso de Estudio

El sistema en estudio se basa en el IEEE 4 Test Feeder, pero con ciertas modificaciones con el fin de obtener una mejor comprensión al momento de optimizarlo

Las modificaciones establecidas incluyen la incorporación de una línea de transmisión de doble circuito, dónde el modelo original contiene una línea de transmisión simple y se suprime el transformador.

Otra modificación establecida es la incorporación de un generador de tipo distribuido sin características específicas del funcionamiento del mismo. Este generador está conectado, en la barra 3 mientras que la carga se encuentra en la barra 4. Esto se puede observar de mejor forma en la figura 4 [37].

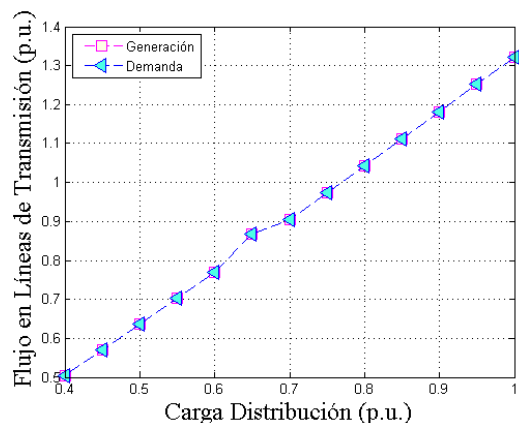


**Figura 4:** Sistema de 4 Barras con generación distribuida.

En la figura 5 se puede observar el comportamiento del sistema cuando la demanda es exactamente cubierta con la capacidad de generación existente que es inyectada al sistema.

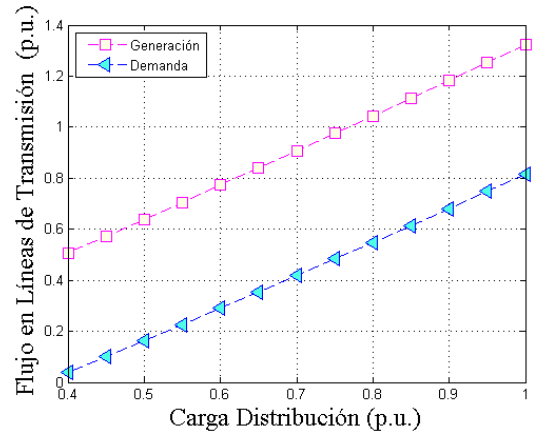
Se observa un flujo creciente en función de un aumento sostenido de la demanda del sistema, sabiendo que cierto instante la demanda superará a la generación disponible y la capacidad de las líneas instaladas.

En esta instancia, las líneas se encuentran en un punto de operación estable, esto implica que no existirán reducciones en el tiempo de vida útil de los equipos involucrados ni desabastecimientos en el suministro de energía al usuario final.



**Figura 5:** Característica del sistema cuando la generación y demanda son iguales.

La figura 6 presenta el flujo circulante por una de las líneas, de color azul, cuando la generación del sistema en estudio, en este caso representada por la línea rosada, es superior a la demanda. Se puede observar con claridad que en este caso el aumento de la demanda implica un aumento cuasi-lineal de la capacidad y la generación requerida para abastecer tal demanda.



**Figura 6:** Característica del sistema cuando la generación tiende a ser mayor a la demanda a cubrir.

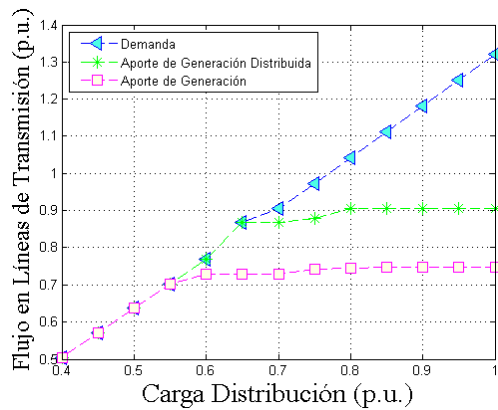
La Figura 7 representa una comparación del comportamiento del flujo circulante por las líneas de transmisión del sistema considerando la demanda como variable independiente, y la conexión o desconexión del generador distribuido antes mencionado.

Se puede visualizar por medio de la línea de color azul que las líneas tienen una tendencia de aumento en su cargabilidad muy pronunciada conforme aumenta la demanda del sistema cuando no existe generación distribuida.

Por otro lado, la línea de color verde expresa el comportamiento del flujo circulante cuando se conecta al sistema la generación distribuida infiriendo que la cantidad de carga que soporta la línea se ve reducida, esto ocurre cuando la demanda supera los 0.7 en p.u. Se puede notar que incluso el flujo circulante puede llegar a estabilizarse.

Además, la línea de color rosado representa la inyección de potencia por medio del generador convencional de la primera barra del sistema, se denota que la inyección de potencia se vuelve casi constante al superar los 0.6 p.u. de carga.



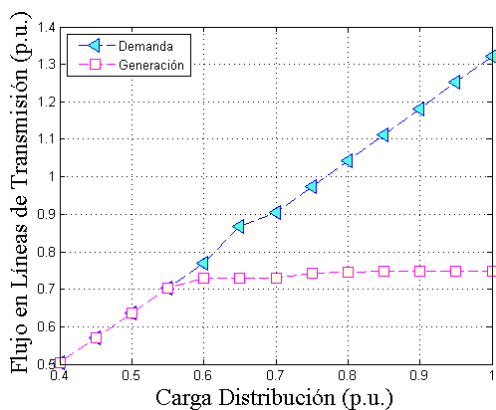


**Figura 7:** Característica del sistema cuando se tiene generación distribuida.

A través de la gráfica 8 se puede observar el comportamiento del sistema cuando la generación disponible no es capaz de abastecer toda la demanda del sistema de distribución, en este caso la línea de color rosado es el comportamiento de la generación normal, se puede notar que cuando la demanda alcanza los 0.6 p.u. la generación instalada alcanza su punto límite estabilizando la cantidad de potencia que inyecta al sistema.

Por otro lado, la línea de color azul tiene un comportamiento de crecimiento constante por lo cual una vez la generación se ve superada existirá un abastecimiento a una cantidad reducida de usuarios.

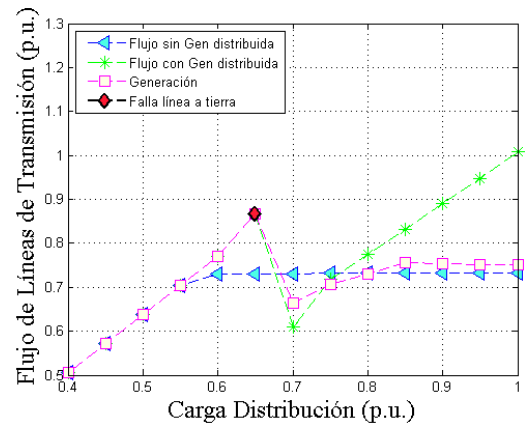
Se debe añadir que los equipos están trabajando por encima de los valores nominales, pudiendo presentarse varios problemas asociados incluyendo reducción de la vida útil, colapsos súbitos, por nombrar otros.



**Figura 8:** Característica del sistema cuando se tiene generación menor a demanda.

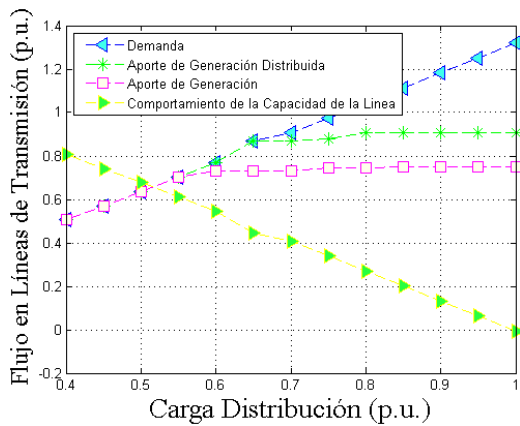
En la figura 9 se puede observar la ocurrencia de una falla línea a tierra cuando la demanda es de 0.75 p.u; representada como un rombo de color azul.

En este caso debido a la existencia de un doble circuito la inyección de potencia del generador convencional, de color rosado prácticamente es igual a la del sistema en condiciones nominales, el flujo circulante de color azul se ve reducido en la ocurrencia de la falla, pero luego conserva su característica lineal mientras que la generación distribuida en verde se ve también reducida, posteriormente recupera la característica. Se puntualiza que las variaciones implican que la carga no esté correctamente alimentada



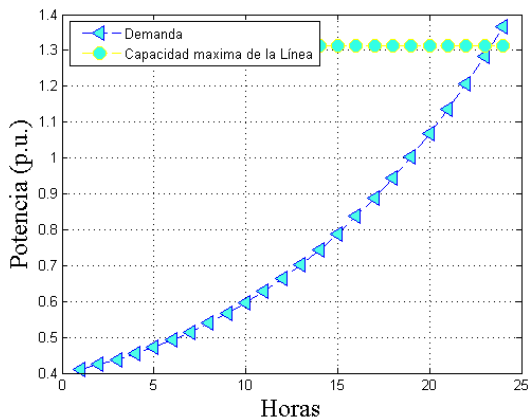
**Figura 9:** Característica del sistema en ocurrencia de falla línea a tierra.

En la figura 10, además del comportamiento ya descrito del flujo en azul, la generación normal en rosado y la distribuida en verde, en función del aumento de demanda; también se presenta la variación de la capacidad de la línea representada con la curva de color amarillo; se observa que conforme aumenta la demanda, la capacidad disponible se ve reducida, llegando a un punto máximo en donde las líneas de distribución están sobrecargadas y ya no se puede abastecer a toda la demanda.



**Figura 10:** Comportamiento de la capacidad de la Línea de Distribución.

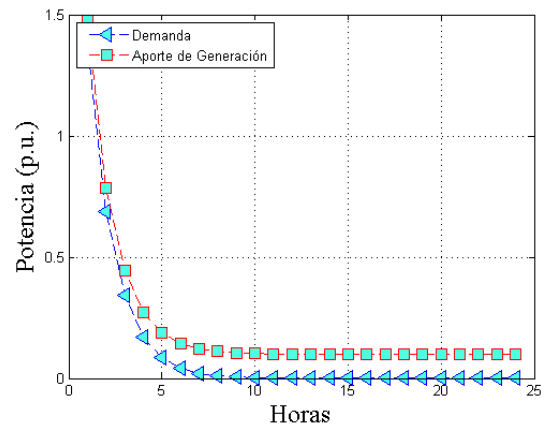
Al tener limitación en la capacidad de la línea de distribución de la energía eléctrica se deja una parte de la demanda en estudio totalmente desabastecida, como se puede observar en la figura 11, en donde se tiene una capacidad máxima de línea de distribución que se interseca en un punto con el aumento de flujo y por tanto demanda.



**Figura 11:** Comportamiento de la capacidad Máxima de la Línea de Distribución Vs Demanda en estudio.

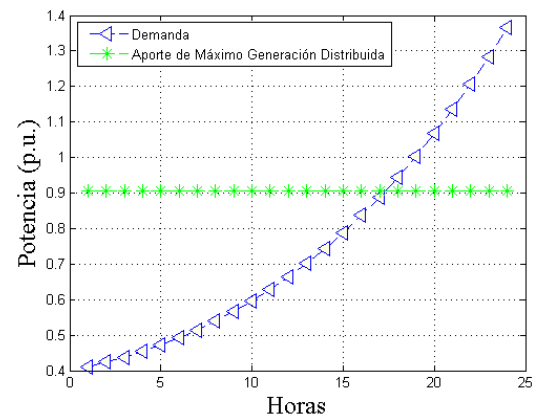
Por otro lado, se debe considerar la duración de la demanda en forma diaria, en la cual se observa que se va cubriendo las necesidades de la demanda, por medio de la generación disponible sea convencional o distribuida; pero en cierto punto no será posible cubrir toda

la demanda con la generación disponible como se puede observar en la figura 12.



**Figura 12:** Comportamiento de la Duración de la Demanda Vs Aporte de Generación.

Otro de los análisis que se ha realizado es notar el valioso aporte de la generación distribuida, que ayuda a que parte de la demanda sea abastecida; reduciendo el flujo circulante por las líneas. Se debe establecer que la generación distribuida tendrá un límite de potencia que puede entregar, por lo cual no es posible asegurar que la totalidad de la carga se encuentre abastecida en el tiempo, como se observa en figura 13, y esto derivará en un aumento en la carga en las líneas de distribución.

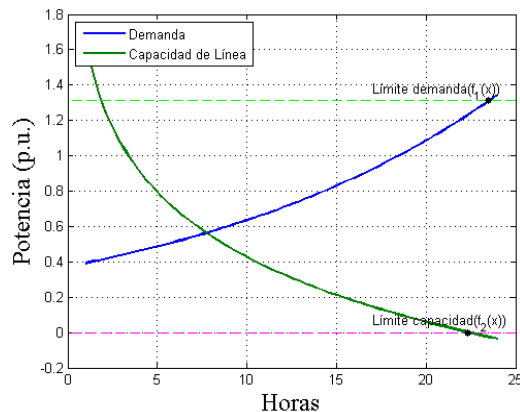


**Figura 13:** Comportamiento de la Duración de la Demanda Vs Aporte de Generación Distribuida.

La figura 14 establece una relación entre la demanda, de color azul, que crece en el tiempo, mientras que la capacidad de la línea, de color verde se ve disminuida, llegando a cierto punto límite en que el sistema de distribución podrá ser

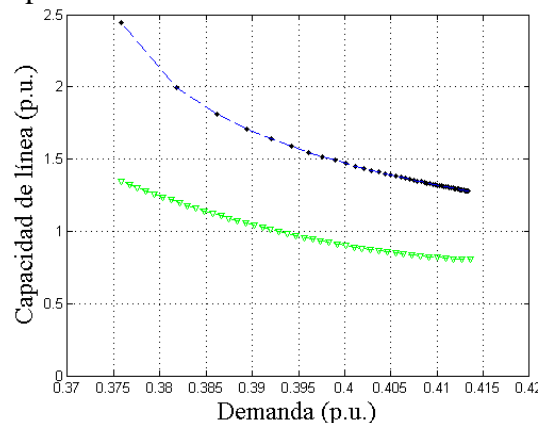


empleado sin que sus elementos estén trabajando por encima de las condiciones nominales.



**Figura 14:** Cambios en la demanda y la capacidad de la línea en el tiempo.

Este será el punto de partida para llevar a cabo la optimización, mediante la forma multiobjetiva de Pareto, sabiendo que se pretende que la capacidad de las líneas sea maximizada mientras que la demanda deberá minimizarse por medio de las estrategias de gestión de la demanda. En la figura 15 se puede apreciar tal optimización, en el eje X se encuentra la demanda minimizada mientras que en el eje Y se encuentra la capacidad de la línea con una maximización; esto en la línea de color negra. El punto óptimo es tener una demanda de entre 0.4 y 0.41 por unidad y una capacidad de aproximadamente 1.5 p.u.; lo que supone un aumento respecto a lo que se nota en la curva de color verde que es el sistema sin optimización.



**Figura 15:** Conjunto multiobjetivo de Pareto eficiente de demanda y capacidad de línea.

## 5. Conclusiones

Al existir una optimización multiobjetivo de Pareto, se observa que al minimizar la demanda y maximizar la capacidad del flujo de línea el sistema puede soportar un crecimiento de la demanda del 0.9 p.u. llegando a 2 p.u.; siendo una alternativa efectiva y que tiene robustez si se escogen adecuadamente los objetivos a plantearse.

El flujo de las líneas de transmisión ha sido optimizado permitiendo que la curva de la demanda sea minimizada en más del 55% ayudando así a que la generación pueda cubrir a los clientes con facilidad; por medio de técnicas de gestión de la carga; aumentando la vida útil de la estructura física de generación tanto convencional como distribuida del sistema de distribución.

Se ha enfocado en maximizar la capacidad de la línea el flujo circulante, el cual ha sido optimizado en más de un 40% permitiendo que la demanda sea abastecida; pero también sabiendo que a futuro será necesario realizar cambios ante el crecimiento de la demanda en el tiempo.

El aporte de la generación distribuida es significativo ya que implica que la red no trabaje sobre o entre los límites, además se cubrir una parte de la demanda en caso de que el sistema en estudio presente fallas en una de tales líneas. Esto permite que el flujo alimentación de las mismas se reduzcan y el momento en que se sobrecarguen las líneas esté más lejano en el tiempo.

## Referencias

- [1] G. Liu and K. Tomsovic, "A full demand response model in co-optimized energy and reserve market," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 111, pp. 62–70, 2014.
- [2] S. Yu, K. Wang, and Y.-M. Wei, "A hybrid self-adaptive

- Particle Swarm Optimization–Genetic Algorithm–Radial Basis Function model for annual electricity demand prediction,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 176–185, 2015.
- [3] E. Karfopoulos, L. Tena, a. Torres, P. Salas, J. G. Jorda, a. Dimeas, and N. Hatziargyriou, “A multi-agent system providing demand response services from residential consumers,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 120, pp. 163–176, 2014.
- [4] A. Kavousi-Fard and T. Niknam, “Multi-objective stochastic Distribution Feeder Reconfiguration from the reliability point of view,” *Energy*, vol. 64, pp. 342–354, 2014.
- [5] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, J. F. Coronel, and I. R. Maestre, “A review of HVAC systems requirements in building energy regulations,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 2–3, pp. 255–268, 2011.
- [6] A. Asrari, S. Lotfifard, and M. S. Payam, “Pareto Dominance-Based Multiobjective Optimization Method for Distribution Network Reconfiguration,” *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–10, 2015.
- [7] R. Gulbinas, R. K. Jain, and J. E. Taylor, “BizWatts : A modular socio-technical energy management system for empowering commercial building occupants to conserve energy,” *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 1076–1084, 2014.
- [8] M. Ali, J. Jokisalo, K. Siren, and M. Lehtonen, “Combining the demand response of direct electric space heating and partial thermal storage using LP optimization,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 106, pp. 160–167, 2014.
- [9] M. Li, S. Yang, and X. Liu, “Shift-based density estimation for pareto-based algorithms in many-objective optimization,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 18, no. 3, pp. 348–365, 2014.
- [10] J. Cho, S. Jeong, and Y. Kim, “Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 48, pp. 84–101, 2015.
- [11] H. Morais, P. Faria, and Z. Vale, “Demand response design and use based on network locational marginal prices,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 180–191, 2014.
- [12] R. S. Ferreira, L. a. Barroso, and M. M. Carvalho, “Demand response models with correlated price data: A robust optimization approach,” *Appl. Energy*, vol. 96, pp. 133–149, 2012.
- [13] G. Kanagaraj and A. Mahalingam, “Designing energy efficient commercial buildings - A systems framework,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, pp. 2329–2343, 2011.
- [14] V. M. Rueda, J. David, V. Henao, C. Jaime, and F. Cardona, “Electricidad Usando Modelos No Lineales Recent Advances in Load Forecasting Using Nonlinear Models,” *Dyna*, vol. 167, pp. 36–43, 2011.
- [15] R. H. Qi, L. Lu, and Y. Huang, “Energy performance of solar-assisted liquid desiccant air-conditioning system for commercial building in main climate zones,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 88, pp.

- 749–757, 2014.
- [16] J. Brooks, S. Kumar, S. Goyal, R. Subramany, and P. Barooah, “Energy-efficient control of under-actuated HVAC zones in commercial buildings,” *Energy Build.*, vol. 93, pp. 160–168, 2015.
  - [17] H. a. Aalami, M. Parsa Moghaddam, and G. R. Yousefi, “Evaluation of nonlinear models for time-based rates demand response programs,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 65, pp. 282–290, 2015.
  - [18] C. Milan, M. Stadler, G. Cardoso, and S. Mashayekh, “Modeling of non-linear CHP efficiency curves in distributed energy systems,” *Appl. Energy*, vol. 148, pp. 334–347, 2015.
  - [19] A. Zakariazadeh, O. Homaei, S. Jadid, and P. Siano, “A new approach for real time voltage control using demand response in an automated distribution system,” *Appl. Energy*, vol. 117, pp. 157–166, 2014.
  - [20] H. Mori and Y. Yamada, “An efficient multi-objective meta-heuristic method for distribution network expansion planning,” *2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proc.*, vol. 2, pp. 374–379, 2007.
  - [21] S. Mohammadi, S. Soleymani, and B. Mozafari, “Scenario-based stochastic operation management of MicroGrid including Wind, Photovoltaic, Micro-Turbine, Fuel Cell and Energy Storage Devices,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 525–535, 2014.
  - [22] N. Rezaei and M. Kalantar, “Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept : An integrated demand response and droop controlled distributed generation framework,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 92, pp. 287–301, 2015.
  - [23] V. Mohan, J. G. Singh, W. Ongsakul, and M. P. R. Suresh, “Performance enhancement of online energy scheduling in a radial utility distribution microgrid,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 79, pp. 98–107, 2016.
  - [24] H. Marzoughi, G. Verbi??, and D. J. Hill, “Aggregated demand response modelling for future grid scenarios,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 5, pp. 94–104, 2016.
  - [25] M. Dehmer and F. Emmert-Streib, *QUANTITATIVE Graph Theory: Mathematical Foundations and Applications*. 2015.
  - [26] F. Afsari, “Multiobjective Optimization of Distribution Networks Using Genetic Algorithms,” ... *Symp. Commun. Syst. Networks ...*, no. 1, 2006.
  - [27] B. Türkay and T. Artaç, “Optimal Low-Voltage Distribution Network Design Using GENETIC ALGORITHM.”
  - [28] G. Grigoras and F. Scarlatache, “Energy losses estimation in electrical distribution networks with a decision trees-based algorithm,” *2013 - 8th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2013*, pp. 10–13, 2013.
  - [29] D. E. Goldberg, *GENETIC ALGORITHMS*. 1989.
  - [30] C. K. B. P. S. Kannan, “A Novel Approach for ATC Computation in Deregulated Environment,” *Architecture*, 2006.
  - [31] G. Fu and Z. Kapelan,

- “EMBEDDING NEURAL NETWORKS IN MULTIOBJECTIVE GENETIC,” pp. 888–898, 2012.
- [32] E. G. Carrano, L. A. E. Soares, R. H. C. Takahashi, R. R. Saldanha, and O. M. Neto, “Electric Distribution Network Multiobjective Design Using a Problem-Specific Genetic Algorithm,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 2, pp. 995–1005, 2006.
- [33] D. Das, “A Fuzzy Multiobjective Approach for Network Reconfiguration of Distribution Systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, pp. 202–209, 2006.
- [34] R. Syahputra, “Fuzzy Multi-Objective Approach for the Improvement of Distribution Network Efficiency By Considering Dg,” *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 57–68, 2012.
- [35] M. Iqbal and M. Rizwan, “Application of 80/20 rule in software engineering Waterfall Model,” *2009 Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ICICT 2009*, no. Author 1, pp. 223–228, 2009.
- [36] K. Liu, W. Sheng, and S. Cheng, “Optimal power flow algorithm and analysis in distribution system considering distributed generation,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 2, pp. 261–272, 2014.
- [37] T. Sansawatt, L. F. Ochoa, and G. P. Harrison, “Decentralised Voltage Regulation,” *Engineering*, pp. 1–6, 2010.